

文章编号: 1001-0920(2004)11-1259-04

一种基于模糊推理的自组网成簇控制策略

赵春晓^{1,2}, 王光兴¹

(1. 东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110004; 2. 渤海大学 信息科学与工程学院, 辽宁 锦州 121000)

摘要: 研究了模糊控制技术的使用。对于每种度量, 定义了相应的模糊隶属度函数用于预测一个更稳定的链路, 实现了一个模糊推理规则库以产生每种链路的模糊代价, 并提出一种基于移动预测机制的 δ 度约束的分布式成簇策略。成簇问题可归结为寻找一个极大独立集问题, 给出了算法及其正确性证明。仿真结果表明, 该方法的稳定性优于 HD 算法和 LCC 算法。

关键词: 移动自组织网络; 极大独立集; 成簇; δ 度; 模糊推理模型

中图分类号: TP393

文献标识码: A

Clustering control strategy based on fuzzy reasoning in MANET

ZHAO Chun-xiao^{1,2}, WANG Guang-xing¹

(1. School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2. School of Information Science and Engineering, Bohai University, Jinzhou 121000, China. Correspondent: ZHAO Chun-xiao, E-mail: zhaochunxiao@sohu.com)

Abstract: The use of fuzzy controlling techniques is investigated. For each metric, a fuzzy membership function is defined to predict a more stable link. A fuzzy-inference rule base is implemented to generate the fuzzy cost of each link. A δ -degree clustering algorithm based on a mobility prediction scheme is proposed in a distributed manner. The clustering can be reduced to finding a maximal independent set (MIS) problem. An algorithm is proposed, and the correctness of the algorithm is proved. Simulation results show that the proposed scheme outperforms LCC and HD clustering algorithms.

Key words: mobile ad-hoc network; maximal independent set; clustering; δ -degree; fuzzy reasoning

1 引言

移动自组织网络(简称自组网, MANET)是一种特殊的对等式网络, 它使用无线通信技术, 网络中的节点互相作为其邻居(在直接通信范围内的节点)的路由器。在目前提出的路由算法中, 基于簇的路由协议是可扩展且最有效的算法之一^[1-3]。在成簇结构的自组网中, 已提出了几种动态成簇策略, 如最高连通度成簇算法 HD^[4], 最低标识符成簇算法 LD^[5], 最少改变量成簇算法 LCC^[6], 节点权算法 DCA^[7], 权度量方法 MOBIC^[8] 和 WCA^[9] 等。

本文仅考虑针对路由的成簇协议。在成簇方案中, 高度动态拓扑且缺少固定架构, 频繁的拓扑改变将导致系统重构, 因此最重要的成簇标准是簇稳定性。本文研究了模糊控制技术的使用, 给出了一个基于时间因素的 δ 度定义, 提出了基于预测最稳定链路生存时间的一种 δ 度约束的分布式成簇算法 δ -DCA。给出了 δ -DCA 算法的正确性证明。仿真结果表明, δ -DCA 算法的稳定性优于 HD 算法和 LCC 算法。

收稿日期: 2003-10-29; 修回日期: 2004-02-02

基金项目: 国家 863 计划资助项目 (863-708-4-5)。

作者简介: 赵春晓(1964—), 男, 辽宁锦州人, 教授, 从事无线网络与通信的研究; 王光兴(1937—), 男, 辽宁沈阳人, 教授, 博士生导师, 从事网络与通信的研究。

2 自组网网络模型与成簇理论

2.1 网络模型

自组网的拓扑结构模型可表示为一个加权无向图 $G = (V, E)$, 其中: V 为节点的集合, E 为边的集合. 每个网络节点有唯一的标识符代表一个移动主机, 假定每个节点的有效距离相等, 其传输范围为 r . 每个节点独立地移动, 同时速度和方向不断变化, 当两个节点 i 和 j 位于传输范围 r 内, 节点 i 和 j 之间存在无向连接, 记为 $(i, j) \in E$; 当两个节点 i, j 移出传输范围 r 外, 记为 $(i, j) \notin E$.

本文的讨论基于以下的链路层假设: 每个节点仅知道它和相邻节点的标识及运动参数(速度、方向 and 无线传播范围); 有 MAC 协议解决对广播信道的多址问题; 提供 1-跳可靠广播, 即通过正确链路发送的消息都能被该链路另一端的邻居正确接收

2.2 基于模糊推理的链路预测模型

两个节点的链路生存时间与节点之间的距离与两节点的运动方向有关, 但这种关系很难表示为常规的数学解析式, 而模糊逻辑是一种将一空间输入映射到另一空间输出的规则, 模糊性反映事物的不确定性和不精确性, 因而对自组网的动态性有很好的适应性. 同时模糊方法计算简单、易于实现、计算迅速, 适用于实时处理. 因此选择了模糊推理模型处理链路之间的生存时间

模糊推理系统的基本结构由 3 个重要部件组成: 1) 规则库: 包含一系列模糊规则; 2) 数据库(或词典): 定义了模糊规则中用到的隶属函数; 3) 推理机制: 它按照规则和所给事实执行推理过程求得合理的输出或结论

如图 1 所示, 为节点距离的模糊隶属度函数 $\mu_{\text{dist}}(d)$. 其论域为 $[0, r]$, r 表示传输范围, 有 3 个语言词: Nea, Med, Far, 含义分别为短、中、长

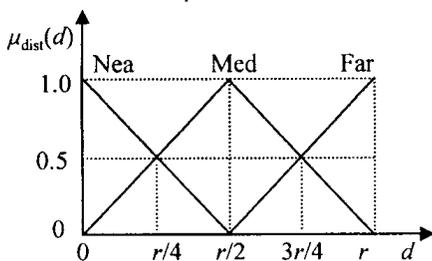


图 1 节点距离的模糊隶属度函数

如图 2 所示, 为节点运动速度的模糊隶属度函数 $\mu_{\text{dire}}(v)$. 速度 v 的论域为 $[-v_{\text{max}}, v_{\text{max}}]$, 其中: $-v_{\text{max}}$ 表示两节点背向而行时速度阈值, v_{max} 表示

两节点同向而行时速度阈值, 有 3 个语言词: Awa, Sta, Tow, 含义分别为背向、静止、同向

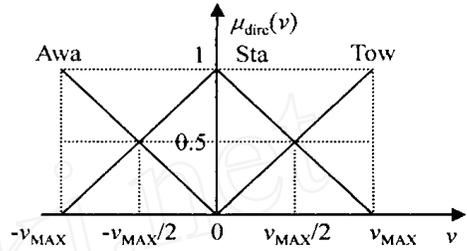


图 2 节点运动速度的模糊隶属度函数

该系统的输入数据为精确输入, 可看作模糊单点, 由此得到精确的输出. 系统采用 Segeno 模糊模型, 因为该机制不需要耗时和去模糊化运算. Segeno 模糊模型中典型的模糊规则形式为

$$\text{if } x \text{ is } A \text{ and } y \text{ is } B \text{ then } L_i = f(x, y).$$

其中: A 和 B 是前件中的模糊集合, $L_i = f(x, y)$ 是后件中的精确函数. 系统使用的是零阶 Segeno 模糊模型

规则如表 1 所示, 其中第 i 个链路的生存时间记为 L_i , 其值为 L, M, S, 分别表示长、中、短, 它们均为精确值

表 1 链路生存时间的模糊规则

规则	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	Nea	Med	Far	Nea	Med	Far	Nea	Med	Far
B	Awa	Awa	Awa	Sta	Sta	Sta	Tow	Tow	Tow
L_i	L	M	S	L	L	L	L	L	M

2.3 成簇理论

本文主要讨论 2-跳成簇. 2-跳成簇满足下列属性: 在簇中心有一个簇首(CH), 簇首可在单跳内与簇中任何节点通信; 任何两个簇首不能直接相邻; 一个簇中的任何两个节点至多 2-跳; 每个簇有且只能有一个簇首

定义 1 一个图 $G = (V, E)$ 的独立集 $IS \subseteq V$ 满足 IS 中没有与 E 中的边连接的节点, 即 $IS = \{k \mid \forall j \in IS, (j, k) \notin E\}$.

定义 2 $G = (V, E)$ 为一个无向图, 若 V 是独立集, 如果 V 中再加 λ 任何顶点都不再是独立集, 则称 V 为极大独立集^[11].

定义 3 $G = (V, E)$ 为一个无向图, 对于任一顶点 $i, N(i)$ 为顶点 i 的邻居集; 对任意一个顶点子集 $S \subseteq V, N(S) = \{k \mid \exists j \in S, (j, k) \in E\}$, 则 $N(S)$ 为顶点子集 S 的邻居集

成簇问题在数学的图论理论中可归结为寻找一

个极大独立集问题^[11].

3 δ 度约束的成簇算法

3.1 算法描述及正确性证明

定义 4 设 $v \in V$, 图 G 中与顶点 v 关联的边的数目称为 v 的度^[11], 记作 $sd(v)$.

定义 5 若 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, 则相应得到一序列 $\{sd(v_1), sd(v_2), \dots, sd(v_n)\}$, 称其为图 G 的节点度序列

对于给定的图及其节点的给定编号, 度序列是唯一确定的. 但如果选择邻居集中最大节点度作为簇首标准, 那么以上的度将是按距离定义的. 因为自组网的高度动态拓扑, 所以序列 $\{sd(v_1), sd(v_2), \dots, sd(v_n)\}$ 频繁地改变其顺序, 造成了簇首及簇成员隶属关系的频繁改变, 如图 3 所示. 其中: v_1 为簇首; v_2, v_3, v_4, v_5 为簇成员, v_6 为网关, 实线为链路, 虚线为簇边界, 箭头为节点运动速度与方向.

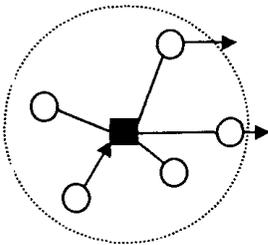


图 3 簇拓扑

由图 3 可以看出, 按最高度成簇算法 HD, 尽管当前簇首节点有最高度 5, 但因簇成员节点都处于簇边界, 所以当前簇首节点的度很快降为 2. 实际上, 按 HD 算法, 如果最高度节点(当前簇首)即使仅失去一个邻居节点, 也可能不被重新选为簇首, 导致簇首频繁地改变. 为此, 本文引入了节点的时间量 δ 约束的度概念.

定义 6 设 $v \in V$, 对于给定的时间量 δ , 图 G 中与顶点 v 关联且满足预测时间 $t > \delta$ 的边的数目, 称为 v 的时间量 δ 约束的度, 简称为 δ 度, 记作 $td(v)$.

定义 7 若 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, 则相应得到一序列 $\{td(v_1), td(v_2), \dots, td(v_n)\}$, 称为图 G 的 δ 度序列

由图 3 可以看出, 当前的簇首节点的最高度为 5, 但由于簇成员节点有两个处于簇边界, 簇首节点的度将很快改变, 但其 δ 度值为 3, 且 δ 度值能尽可能长时间保持不变. 一般来说, 根据定义 6, δ 度序列 $\{td(v_1), td(v_2), \dots, td(v_n)\}$ 相对较稳定, 可得到稳定的簇结构.

这样, 寻找一个簇首节点就可简化为一种在无线自组网拓扑图中确定极大独立集, 并使用 δ 度作为确定极大独立集成员的规则. 本文提出如下的 δ 度约束的分布式成簇算法:

1) 簇的初始化

基于伪 C 代码的分布式成簇算法如下:

δ -degree clustering algorithm ($N(i)$)

/* 参数 $N(i)$ 为 1-跳邻居表 */

{for($j \in N(i)$)

if($i.td > j.td$)

{ $i.role = Head$;

i send clusterhead message to j ;

/* 簇首节点 i 发消息给节点 j */

return; }

else if ($i.td == j.td$)

$i.role = Head$; }

/* 任取一个作为簇首 */

upon receiving clusterhead from j

{ $j.role = Head$;

/* 标记节点 j 为簇首 */

i send Join message to j ;

/* 节点 i 发加入到以 j 为簇首的消息给节点 j */

return; }

upon receiving Join(j, k) message from j

{ $j.role = member$;

/* 标记节点 j 为成员 */

for($m \in N(i)$ and $m \neq i$)

if($m.td > i.td$) and ($m.role = member$)

{ i send clusterhead message to m ;

/* 节点 i 发成员消息给簇首节点 j */

return; }

如图 4 所示, 为根据该算法生成的簇结果. 本文仅给出节点 6 的 δ -邻接表, 如表 2 所示.

2) 簇的维护

簇的维护要保持簇首生存时间尽可能长, 故给出如下规则: 当一个簇 i 的非簇首节点移入一个簇

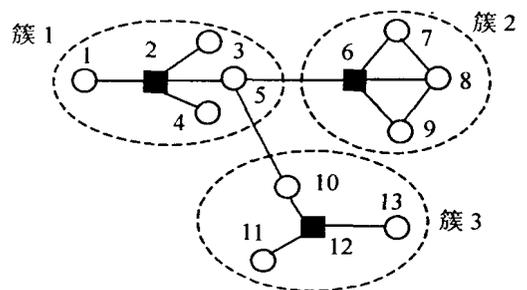


图 4 δ 度成簇

表 2 节点 6 的 δ 邻接表

D	Deg	δ Deg	CH-D
5	6	3	2
6	4	4	6
7	4	2	6
8	3	3	6
9	4	2	6

j , 两个簇首均不改变; 当一个非簇首节点移出当前簇, 没有进入任何已存在的簇, 它将成为一个新的簇首, 形成一个新簇; 当簇首 $CH(i)$ 从簇 i 移到簇 j , 则 $CH(i)$ 和 $CH(j)$ 竞争当前簇首, 根据当前的 δ 度值, $CH(i)$ 或 $CH(j)$ 将放弃它的簇首

3.2 算法正确性证明

定理 1 设 I 为算法标志 clusterhead 的节点, 则 I 为极大独立集

证明 由定义 2, 只需证明 $I \cap N(I) = \emptyset, I \cup N(I) = V$ 即可.

假设 $I \cap N(I) \neq \emptyset$, 若 i 和 $j \in I$, 则 i, j 都已标志为 clusterhead, 设 $j.td > i.td$, 因为 i 和 j 相邻, 那么由算法知, i 标志为 clusterhead, 当且仅当所有满足 $j.td > i.td$ 的邻居节点 j 都已成为另一个簇成员, 故已标志为 member. 这与 i 标志为 clusterhead 相矛盾, I 的独立性结论得证

因为 $I \subseteq V, N(I) \subseteq V$, 故 $I \cup N(I) \subseteq V$. 取一个节点 $i \in V$, 由算法知, 若节点 i 标志为 clusterhead, 则 $i \in I$; 若节点 i 标志为 member, 则 $i \in N(I)$, 而 $N(I) = \cup N(i)$, 故 $i \in N(I)$ 即 $V \subseteq I \cup N(I)$. I 的极大性得证

4 实验分析

对 HD, LCC 和 δ 度约束的成簇算法进行了仿真比较, 仿真参数取值分别为: 主机节点数为 100, 传输范围半径为 200 m, 主机漫游速度为 0~10 m/s, 取 $\delta = 0.125 r/v_{max}$ (r 为传输范围, v_{max} 为节点运动最大速度, 实验结果如图 5 所示. 从图中可以看出, δ -度约束的成簇算法的簇生存时间明显高于

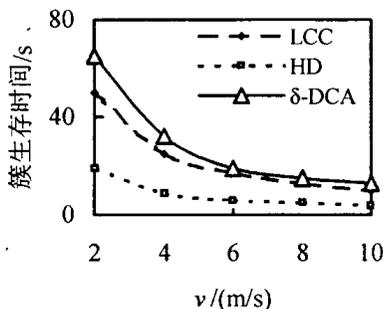


图 5 仿真结果

LCC 和最大速度)HD 算法的簇生存时间

5 结 语

本文研究了模糊控制技术的使用, 提出了基于移动预测机制的一种 δ 度约束的分布式成簇算法. 仿真结果表明, 尽管成簇当时, 该算法的连通度低于 HD 算法, 但从仿真效果看, 该方法的稳定性高于 HD 算法

参考文献 (References):

- [1] Hong X Y, Xu K X, Gerla M. Scalable routing protocols for mobile ad hoc networks[J]. *IEEE Network*, 2002, 7(8): 11-21.
- [2] Lin C R, Gerla M. A adaptive clustering for mobile wireless networks[J]. *IEEE J of Selected Areas in Communication*, 1997, 15(7): 1265-1275.
- [3] Chen W, Jain M. ANMP a ad hoc network management protocol[J]. *IEEE J of Selected Areas in Communication*, 1999, 17(8): 1506-1531.
- [4] Tsai J, Gerla M. Multicluster, mobile, multimedia radio network [J]. *ACM Baltzer J of Wireless Network*, 1995, 1(3): 255-265.
- [5] Ephremides A, Wieselthier J E, Baker D J. A design concept for reliable mobile radio networks with frequency hopping signaling[J]. *Proc of IEEE*, 1987, 75(1): 56-73.
- [6] Chiang C C, Wu H K, Liu W, et al. Routing in clusterhead multihop, mobile wireless networks with fading channel[A]. *SICON 97*[C]. Singapore: IEEE Press, 1997. 197-211.
- [7] Basagni S. Distributed clustering for ad hoc networks [A]. *Proc of Int Symposium on Parallel Architectures, Algorithms and Networks*[C]. Fremantle, 1999. 310-315.
- [8] Basu P, Khan N, Little D C. A mobility based metric for clustering in mobile ad hoc networks[A]. *Workshop on Wireless Networks and Mobile Computing* [C]. Phoenix, 2001. 413-418.
- [9] Chatter M, Das S K, Turgut D. WCA: A weighted clustering algorithm for mobile ad hoc networks[J]. *Cluster Computing*, 2002, 5(2): 193-204.
- [10] Manoj B S, Ananthapadmanabha R, Siva Ram Murthy C. Link life based routing protocol for ad hoc wireless networks[A]. *10th Int Conf on Computer Communications and Networks*[C]. Arizona, 2001. 15-17.
- [11] 耿素云. 集合论与图论[M]. 北京: 北京大学出版社, 1998. 877-880.